

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЛАВКИ ОТХОДА МЕТАЛЛУРГИИ НА ФЕРРОСИЛИЦИЙ

Аннотация

В настоящей работе приведены результаты исследования по определению типа электрического режима плавки и влияние его на технологические показатели получения конечного продукта, в частности ферросилиция, получаемого в результате электротермической переработки отхода металлургии- клинкера вельцевания путем его электроплавки в руднотермической печи. Для определения типа электрического режима и влияния его на технологические показатели плавки клинкера вельцевания нами было проведено осциллографирование процесса с использованием осциллографа марки С1-55. В процессе исследований нами были получены результаты, которые свидетельствуют о том, что электроплавка клинкера вельцевания на ферросилиций характеризуется наличием дугового разряда, в котором выделяется 22,7 % подводимой к печи мощности, а основная часть энергии (75 %) выделяется в расплаве.

Ключевые слова: электрический режим, электроплавка, руднотермическая печь, сила тока, напряжение, вольт-амперные характеристики, дуговой режим, осциллограф.

Abstract

In the present work the results of research to determine the type of electric melting mode and its influence on the technological characteristics of the final product, in particular ferrosilicon, received as a result of electro-thermic processing of waste metallurgy - clinker valcavasias by electro in ore-thermal furnace. To determine the type of the electric regime and its influence on the performance of the melting clinker valcavasias we performed the recording process using the oscilloscope C1 grade-55. During researches, we achieved results that indicate that electroplasma clinker valcavasias on ferrosilicon is characterized by the presence of the arc discharge, which is separated by 22.7 % supplied to the furnace capacity, and the main part of energy (75 %) is allocated in the melt.

Keywords: electric mode, electroplate, ore-thermal furnace, current strength, voltage, volt-ampere characteristics of the arc mode, oscilloscope.

При электротермическом способе переработки природного и техногенного сырья важным вопросом является определение типа электрического режима плавки и влияние его на технологические показатели получения целевого продукта [1; 2]. Нами для переработки

крупнотоннажного отхода вельцевания цинксодержащих материалов – клинкера предложена его электротермическая переработка с получением ферросилиция и переводом Zn, Pb в возгоны [3]. Для определения типа электрического режима и влияние его на технологические показатели плавки клинкера вельцевания нами было проведено осциллографирование процесса с использованием осциллографа марки С1-55. Исследования проводились на укрупненной- лабораторной печи с прямоугольной ванной (30 x 30 см) и высотой 40 см. Энергия к ним подавалась от трансформатора ОСУ- 80. Печь была снабжена графитовым электродом $d = 7,5$ см и графитовой подиной толщиной 14 см. В печи для слива продуктов плавки имелась летка $d = 3$ см. Плавка проводилась в непрерывном режиме, с использованием мощности в 28 кВт. Схема установки, на которой проводили исследования, приведена на рис. 1.

На первом этапе исследований были сняты осциллограммы тока (J) и напряжения (U) в период розжига печи на коксике (рисунок 2), из которого следует, что в начальный период розжига печи имеются значительные отклонения линий U и J от синусоид. Так, при $J = 750$ А и $U = 40$ В на кривой напряжения имеются два пика (точки А и Б), которые соответствуют напряжению зажигания и гашению дуги, а на кривой тока при переходе его через нуль имеется промежуток времени ($\Delta\tau$), когда кривая тока стремится занять горизонтальное положение.

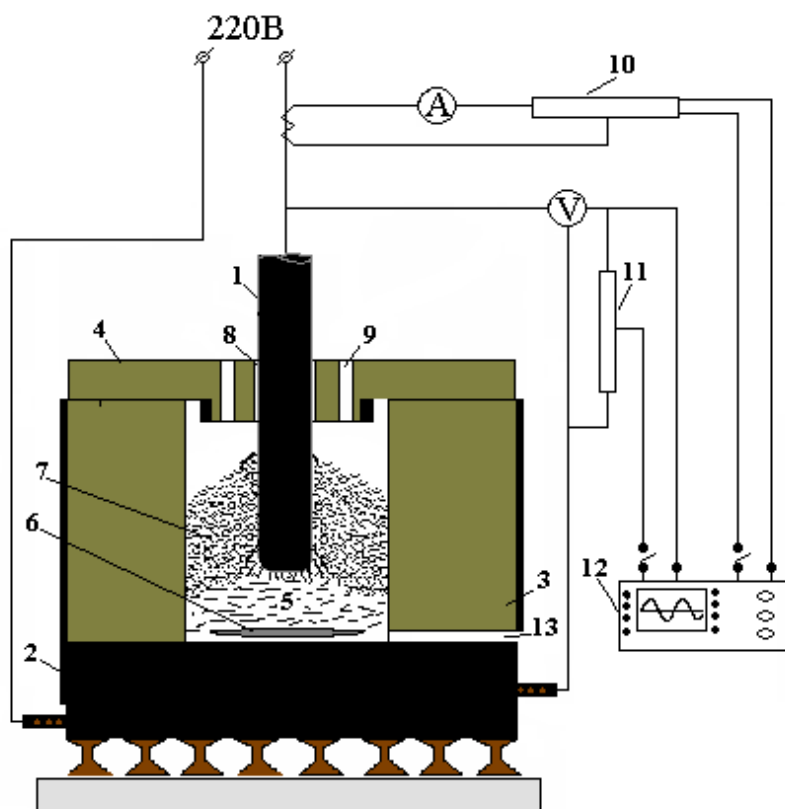


Рис. 1. Схема установки исследования режима электроплавки клинкеров вельцевания Ачисайской цинковой руды: 1 – графитированный электрод; 2 – углеграфитовая подина; 3 – хромомагнетитовая футеровка; 4 – крышка; 5 – расплав; 6 – ферросплав; 7 – клинкер; 8 – отверстие для загрузки шихты; 9 – отверстие для вывода газов; 10, 11 – шунты; 12 – осциллограф С1-93, 13 – летка

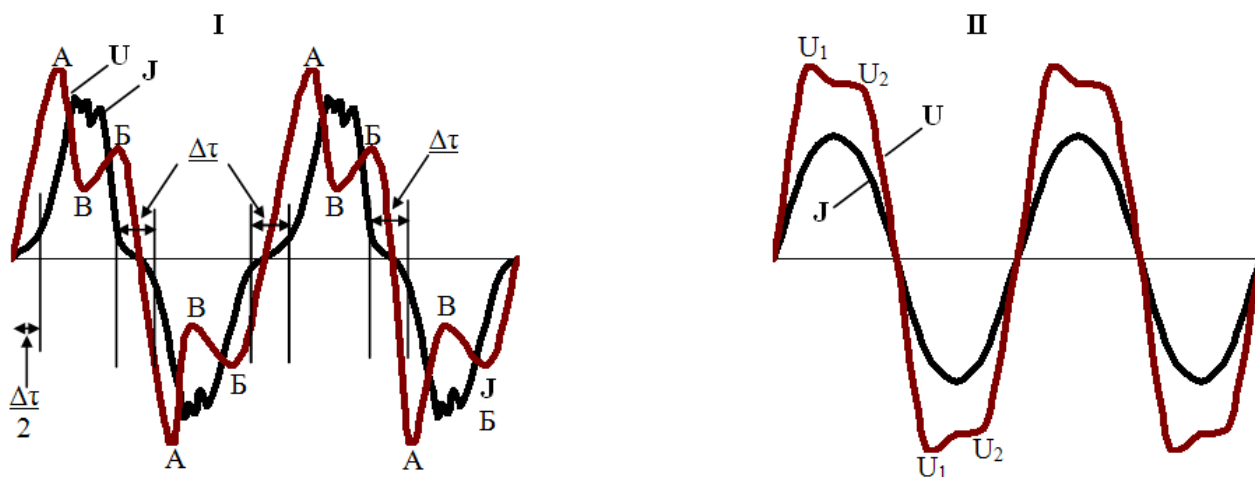


Рис. 2. Осциллограмма силы тока (J) и напряжения (U) розжига печи на коксе:
I – начало розжига ($J = 750$ A, $U = 40$ В); II – окончание розжига ($J = 800$ A, $U = 40$ В)

Подобный характер изменения тока и напряжения относится к неустойчивому дуговому разряду с его сравнительно холодным газовым промежутком и низкой степенью его ионизации [4; 5]. Об этом свидетельствует и форма вольт - амперной характеристики (рис. 3), которая имеет сложный и нелинейный характер с большим гистерезисом. После прогрева печи в течение 2 часов кривые U и J имеют небольшие искажения.

О наличии стабильной дуги в печи свидетельствует некоторая асимметричность трапецевидного характера кривой U , на которой сохраняется неравенство $U_1 > U_2$ в течение каждого полупериода. При этом U - J характеристика имеет также нелинейный характер (рис. 3). Однако, он более близок к линейному, в сравнении с начальным периодом розжига печи. Таким образом, собранная установка позволяет фиксировать различные фазы дугового разряда.

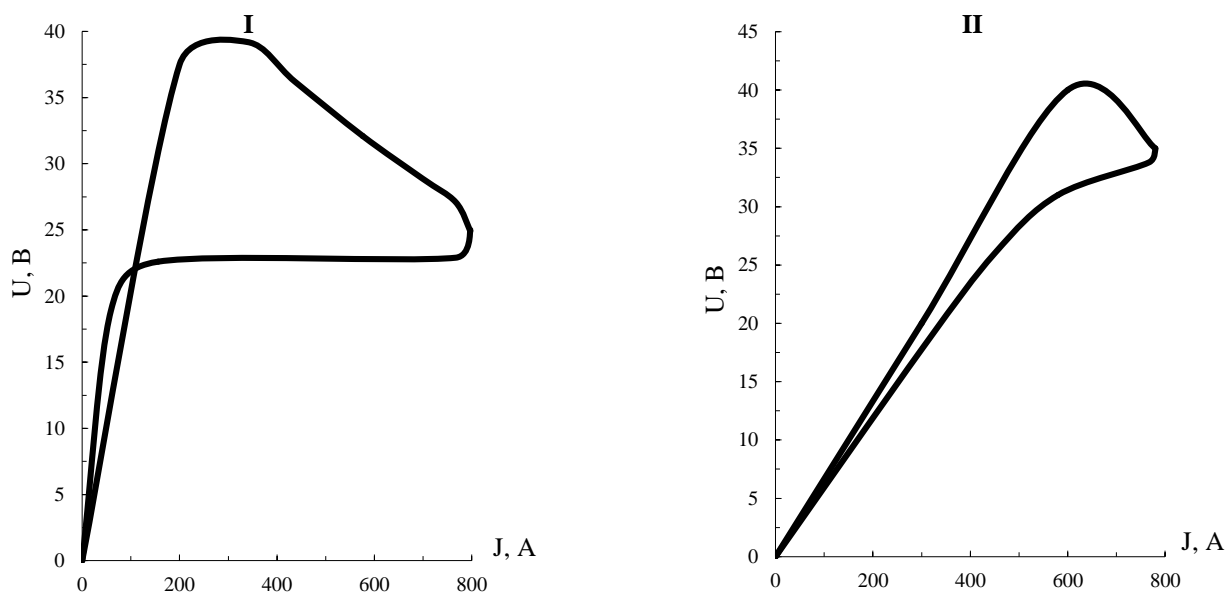


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики розжига печи на коксе:
I – начало розжига ($J = 750$ A, $U = 40$ В); II – окончание розжига ($J = 800$ A, $U = 40$ В)

О наличии стабильной дуги в печи свидетельствует некоторая ассиметричность трапециевидного характера кривой U , на которой сохраняется неравенство $U_1 > U_2$ в течение каждого полупериода. При этом U – J характеристика имеет также нелинейный характер (рис. 3). Однако, он более близок к линейному, в сравнении с начальным периодом розжига печи. Таким образом, собранная установка позволяет фиксировать различные фазы дугового разряда.

Из рис. 4 следует, что в период загрузки печи шихтой в печи работала неустойчивая электрическая дуга, характерными признаками которой являлись искажения напряжения (особенно при максимальных значениях), наличие периода $\Delta\tau$ на кривой J и явно нелинейный характер U – J характеристики (рис. 5).

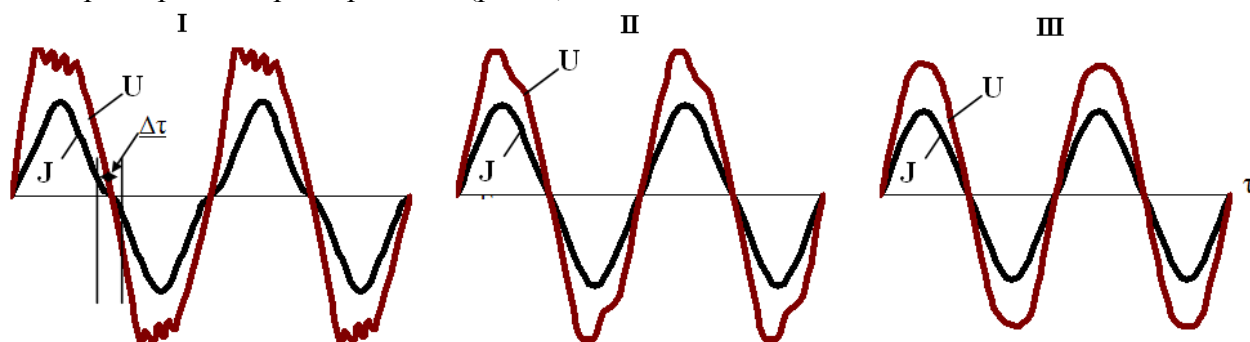


Рис. 4. Осциллограмма силы тока (J) и напряжения (U) электроплавки клинкера вельцевания с получением ферросилиция: I – начало розжига ($J = 650$ А, $U = 50$ В); II – окончание расплавления шихты ($J = 700$ А, $U = 40$ В); III – середина плавки шихты ($J = 1000$ А, $U = 28$ В)

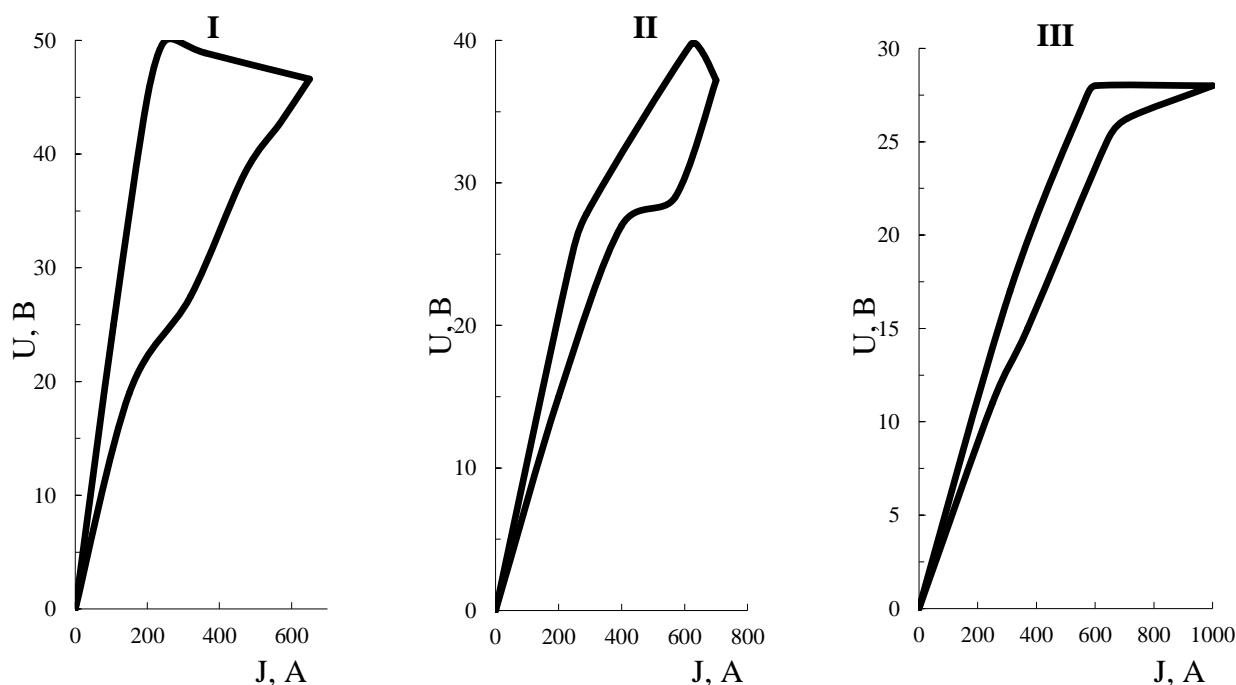


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики процесса получения ферросилиция из клинкера вельцевания Ачисайской руды: I – начало розжига ($J = 650$ А, $U = 50$ В); II – окончание расплавления шихты ($J = 700$ А, $U = 40$ В); III – середина плавки шихты ($J = 1000$ А, $U = 28$ В)

Окончание плавки клинкера характеризуется меньшим искажением U и J (рис. 4). В середине периода электроплавки клинкера (20 минут после расплавления) кривые U и J также имеют отклонения от синусоидальной формы (рис. 3), а U – J характеристика носит не линейный характер (рисунок 5).

Отмеченные проявления свидетельствуют о том, что при электроплавке клинкера электропечь работает в смешанном режиме, когда энергия в ванне выделяется и в расплаве, и в дуговом разряде. Такой режим обеспечивает степень перехода Si в сплав на 88–90,6, а Fe от 96,2 до 97 % и характеризуется отношением глубины погружения электрода в расплав ($h_э$) к диаметру электрода ($d_э$) равным $h_э/d_э=0,37–0,43$.

Подобные исследования проведены нами на опытной установке мощностью 72 кВт и диаметром электрода 20 см с использованием осциллографа С1-93. Кривые U и J периода розжига печи (рис. 6) имеют значительные отклонения от синусоидального характера (точки А, Б и В на кривой U и Δt на кривой J).

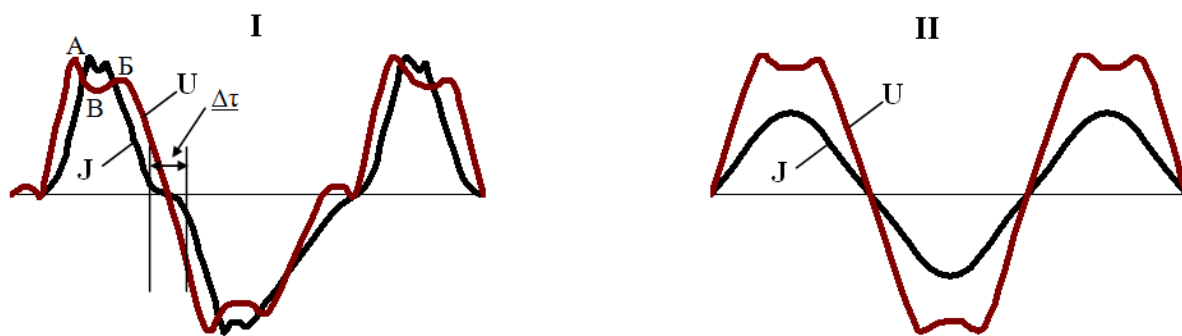


Рис. 6. Осциллограмма силы тока (J) и напряжения (U) электроплавки клинкера вельцевания с получением ферросилиция: I – розжиг печи ($J = 1750$ А, $U = 45$ В); II – электроплавка клинкера ($J = 2000$ А, $U = 36$ В)

Эти признаки, а также нелинейность U – J динамической характеристики (рис. 7) свидетельствуют о наличии в печи электрической дуги.

Иные кривые U и J были получены в период плавки клинкера (рис. 6). В этот период кривая тока ($J_{ампл.} = 200$ А) не имеет каких-либо искажений. О наличие дуги в печи свидетельствуют только искажения кривой напряжения ($U_{д.}=36$ В). Форма U в этом случае близка к трапеции. U – J характеристика плавки клинкера имеет отклонения от прямой в интервале U от 14 до 36 В и J от 600 до 1200 А (рис. 7). Подобная U – J характеристика и кривые U , J свидетельствуют о том, что при электроплавке клинкера основная масса электроэнергии преобразуется в тепловую, по закону Джоуля-Ленца, а доля тепловой энергии, выделяемой в дуговом разряде, значительно меньше [4].

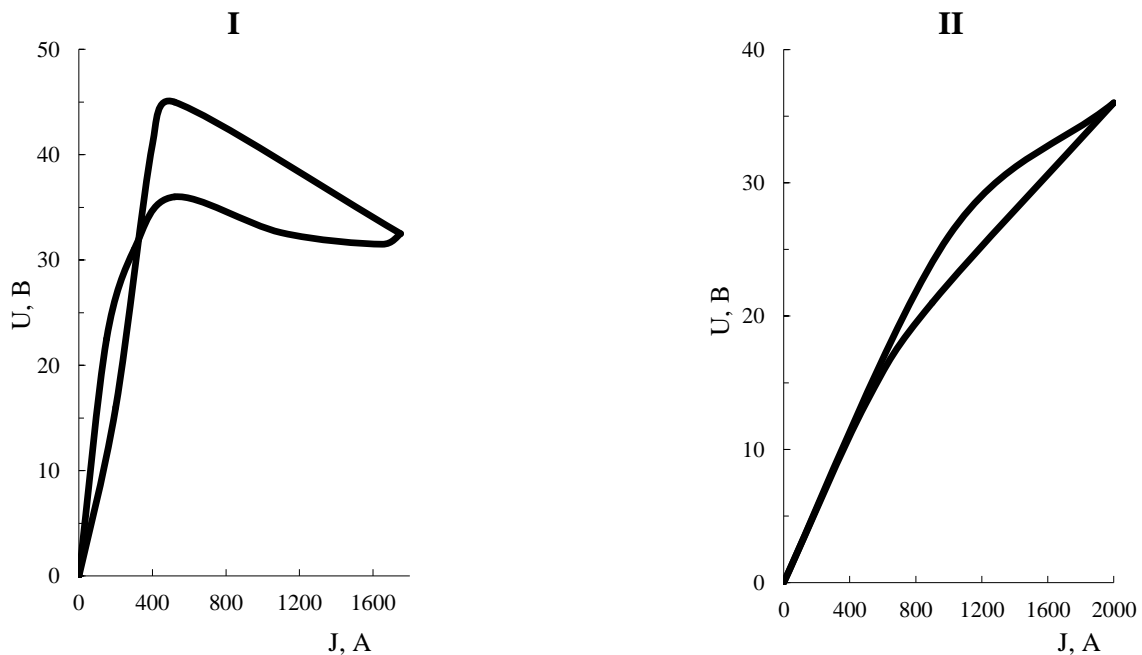


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики процесса получения ферросилиция из клинкера вельцевания Ачисайской руды: I – розжиг печи ($J = 1750$ A, $U = 45$ B); II – электроплавка клинкера ($J = 2000$ A, $U = 36$ B)

Баланс напряжения печи при электроплавке клинкера вельцевания ($U_{\text{печ}}$) можно представить как сумму напряжения, теряемого в электроде ($U_{\text{эл}}$), контакте электрод–щека ($U_{\text{эщ}}$), напряжения закрытой дуги ($U_{\text{дуг}}$) и напряжения, теряемого в расплаве ($U_{\text{распл}}$). В соответствии с [5] при некоторых допущениях:

$$U_{\text{печ}} = U_{\text{эл}} + U_{\text{э-щ}} + U_{\text{дуг}} + U_{\text{распл}} ;$$

$$U_{\text{эл}} = \rho \times l_{\text{эл}} \times \delta_{\text{эл}} ;$$

$$U_{\text{распл}} = R_{\text{распл}} \times J = \rho^I \times \frac{h_p}{\pi r^2} \times K_p \times J ,$$

где ρ – удельное электросопротивление электрода (Ом·см);

$l_{\text{эл}}$ – длина электрода (см);

$\delta_{\text{эл}}$ – плотность тока в электроде (Ом/см²);

ρ^I – эквивалентное удельное сопротивление расплава, равное такому удельному сопротивлению однородной среды, сопротивление растекания тока по которой при тех же геометрических размерах такое же, как и по относительно неоднородному расплаву (Ом·см);

r – радиус электрода (см);

h_p – глубина расплава в ванне печи (см);

K_p – коэффициент, учитывающий отклонение электрического поля в расплаве от плоскопараллельного (определяется из зависимости $K_p = f(h_p/d_{\text{эл}})$).

Из [5] следует, что $U_{\text{э-щ}}$ не превышает 0,35 % от $U_{\text{печ}}$. В нашем случае:

$$U_{\text{эл}} = \frac{J}{3,14 \times r^2} \times l_{\text{эл}} \times \rho = \frac{200}{3,14 \times 10^2} \times 1000 \times 0,08 \times 10^{-2} = 0,51$$

$$U_{э-щ} = 32 \times 0,35 \times 10^{-2} \times 2 = 0,22B$$

$$U_{распл} = 0,6 \times \frac{15}{3,14 \times 100} \times 0,42 \times 2000 = 24B$$

Поэтому $U_{дуг} = 32 - 24 - 0,51 - 0,22B = 7,27B$. Следовательно, подводимая к печи мощность при последовательно соединенных проводниках будет распределяться следующим образом:

в контакте электрод–щека	– 0,68 %;
в электроде	– 1,6 %;
в расплаве (Р _р)	– 75 %;
в дуговом разряде (Р _д)	– 22,72 %.

то есть соотношение $P_p/P_d=3,3$.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить:

- что электроплавка клинкера вельцевания на ферросилиций характеризуется наличием дугового разряда, в котором выделяется 22,7 % подводимой к печи мощности;
- основная часть энергии (75 %) выделяется в расплаве.

Список использованных источников

1. Данцис Я. Б., Ершов В. А. и др. Электротермические процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1984. – 464 с.
2. Свенчанский А. Д., Смелянский М. Я. Электрические промышленные печи. Ч. 2. – М.: Энергия, 1970. – 264 с.
3. Колесников А. С. Разработка комплексной электротермической технологии извлечения цветных металлов и железа из клинкера вельцевания оксидных руд: автореф. канд. техн. наук. Алматы: ЦНЗМО, 2008. – 23 с.
4. Сисоян Г. А. Электрическая дуга в электрической печи. М.: Металлургия, 1974. – 304 с.
5. Платонов Г. Ф. Параметры и электрические режимы металлургических электродных печей. – М., Л.: Энергия, 1965. – 151 с.
6. Цымбал В. П., Мочалов С. П., Калашников С. Н. Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях. В 3-х.: Ч. III. Примеры реализации идей и принципов синергетики: уч. пособие / под редакцией В.П. Цымбала. – Новокузнецк: СибГИУ, 2005. – 264 с.
7. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. – 512 с.
8. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
9. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 2. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 560 с.
10. Темцев Б. Т. Техническая гидромеханика. – М.: Машиностроение, 1978. – 463 с.